第 48 卷第 7 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 48，No. 7
2020 年 7 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　July，2020
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20190566

砂率与浆骨比对大流动性混凝土新拌性能的影响

黎梦圆[1]，刘　宇[1]，韩建国[1]，高玉亭[2]，张慧杰[2]，阎培渝[1]

(1. 清华大学土木工程系，北京 100084；2. 深圳市建工集团股份有限公司，深圳 518051)

摘　要：研究了砂率和浆骨比对大流动性混凝土(HFC)新拌性能的影响。对 2 种强度等级的 HFC，通过改变砂率与浆骨比制得不同性能的拌合物。通过流变试验、工作性试验和滑管试验，研究了 HFC 的新拌性能。结果表明：HFC 的流变性能和工作性对砂率和浆骨比的变化较为敏感。随着砂率的增加，HFC 与润滑层的屈服应力与塑性黏度先减小后增大。砂率改变 6.38%，HFC 屈服应力的变化幅度可高达约 27%，塑性黏度的变化幅度可高达约 78%。随着浆骨比的增加，HFC 与润滑层的屈服应力和塑性黏度逐渐减小。浆骨比改变 16.07%，HFC 屈服应力的变化幅度可高达约 331%，塑性黏度的变化幅度可高达约 204%。混凝土工作性的变化规律与其流变性能的变化规律一致。滑管试验所预测的混凝土泵压与流量之间的线性关系只能反映出润滑层对泵送过程的贡献。基于滑管试验所得的润滑层的屈服应力的可信度较低。

关键词：砂率；浆骨比；工作性；流变性能；泵送性能；大流动性混凝土
中图分类号：TQ178　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)07–1107–07
网络出版时间：2020–04–13

Influences of Sand Ratio and Paste Aggregate Ratio on Fresh Properties of High-Fluidity Concrete

LI Mengyuan[1], *LIU Yu*[1], *HAN Jianguo*[1], *GAO Yuting*[2], *ZHANG Huijie*[2], *YAN Peiyu*[1]
(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Shenzhen Construction Engineering Group Co. Ltd., Shenzhen 518051, China)

Abstract: The influences of sand ratio and paste aggregate ratio on fresh properties of high-fluidity concrete (HFC) were investigated. Two strength grades of HFC with different sand ratios and paste aggregate ratios were prepared. The fresh properties of HFC were investigated by rheological experiment, workability measurement and sliper test. The results show that the rheological properties and workability of HFC are related to the sand ratio and paste aggregate ratio. The yield stress and plastic viscosity of HFC and the lubrication layer initially firstly decrease and then increase with the increase of sand ratio. With the change of sand ratio of 6.38%, the variation range of yield stress of HFC can be up to about 27%, and the variation range of plastic viscosity can be up to about 78%. The yield stress and plastic viscosity of HFC and the lubrication layer gradually decrease with the increase of paste aggregate ratio. With the change of paste aggregate ratio of 16.07%, the variation range of yield stress of HFC can be up to about 331%, and the variation range of plastic viscosity can be up to about 204%. The varying tendency of workability of concrete is consistent with its rheological properties. A linear relationship between pumping pressure and quantity of flow for concrete predicted by sliper test shows the contribution of the lubrication layer to the process of pumping. The reliability of yield stress of the lubrication layer based on the sliper test is low.

Keywords: sand ratio; paste aggregate ratio; workability; rheology; pumpability; high-fluidity concrete

混凝土的泵送过程是施工的关键环节之一，尤其在高层建筑和大跨度桥梁建设工程中[1]。泵送可连续不断地供应混凝土拌合物，提高施工效率，缩短施工时间[2]。但是在混凝土泵送过程中可能出现拌合

收稿日期：2019–08–18。　修订日期：2020–01–13。
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFB0310101)；中国博士后科学基金(2019TQ0162)；国家自然科学基金项目(51678343)。
第一作者：黎梦圆(1988—)，男，博士，助理研究员。
通信作者：阎培渝(1955—)，男，博士，教授。

Received date: 2019–08–18.　**Revised date:** 2020–01–13.
First author: LI Mengyuan (1988–), male, Ph.D., Assistant Researcher.
E-mail: limengyu15@tsinghua.org.cn
Correspondent author: YAN Peiyu (1955–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: yanpy@tsinghua.edu.cn

物泌水和离析，降低混凝土的均匀性，严重时甚至可能导致管道堵塞的施工事故。混凝土的性能在泵送过程中会不断地变化[3–4]。目前还无法在泵送之前对混凝土拌合物的泵送性能进行有效的评估[5–7]。

为了准确地评估混凝土拌合物的泵送性能，需要了解混凝土拌合物在泵管内的稳定流动状态，然后根据具体的流动状态选择或建立适宜的泵送性能评估模型，最后通过实际的泵送过程来验证模型的有效性[8–9]。早期的混凝土拌合物泵送性能评估模型主要用于评估传统的需振实的混凝土(CVC)的性能。在泵送过程中，CVC 一般由润滑层和柱塞流 2 部分组成[10]。如今，大流动性混凝土(HFC)得到越来越多的应用[5,11]。由于 HFC 的屈服应力往往较低，在泵送过程中，除了形成润滑层和柱塞流外，还会形成剪切滑移层[12–13]。由于剪切应力梯度的存在，剪切滑移层和润滑层中的物料颗粒在泵管横截面上会重新分布[14]，导致其中的拌合物的性能发生变化。一般情况下，骨料颗粒比胶凝材料颗粒大很多，所占体积比例也较高。因此，骨料颗粒的含量和分布对 HFC 新拌性能有很大影响。砂率与浆骨比是描述混凝土中骨料含量变化非常简单实用的指标。因此，通过研究砂率和浆骨比对 HFC 新拌性能的影响可以探究骨料含量和粒径分布对 HFC 新拌性能的影响，这有助于研究骨料对混凝土泵送性能的影响。

施工现场采用一些简单方法对于混凝土拌合物的工作性进行评价，并判断其可泵性，比如坍落度和扩展度等。给工程人员参考使用的诺模图就是基于混凝土拌合物的坍落度和扩展度制成的[7, 15–16]。从流变学的角度看，坍落度和扩展度仅能反映混凝土拌合物的屈服应力大小，并不能体现混凝土塑性黏度和剪切增稠或剪切稀化程度的大小[7]，因此，诺模图不能完全反映混凝土拌合物的流变性能。

滑管仪是目前测量混凝土泵送性能的最新装置[17–18]。该仪器方便携带，适合在工程现场对混凝土拌合物的泵送性能进行测量，并可根据测量的数据直接绘制“泵压–流量”图。根据文献[17]，该仪器所测量得到的泵压 P 与流量 Q 的关系为：

$$P = A + BQ \tag{1}$$

式中：A 为“泵压–流量”直线的截距(Pa)；B 为“泵压–流量”直线的斜率(Pa·s·m^{-3})。

利用滑管仪测量混凝土拌合物的性能时会在滑管内壁形成一层润滑层，这与实际泵送过程相似。因此，滑管仪可用于测量润滑层的性能。润滑层的屈服应力 $\tau_{0,\mathrm{LL}}$ 和黏性系数可分别利用式(2)与式(3)计算，其中润滑层的黏性系数是指润滑层的塑性黏度 η_{LL} 与润滑层厚度 e 的比值：

$$\tau_{0,\mathrm{LL}} = \frac{\mathrm{d}A}{4l} \tag{2}$$

$$\frac{\eta_{\mathrm{LL}}}{e} = \frac{B\pi d^3}{16l} \tag{3}$$

式中：l 为滑管仪的管道长度，0.500 m；d 为滑管仪的管道直径，0.126 m。

滑管仪的管筒长度有限，配重小，滑动过程中产生的等效泵压比实际泵送混凝土时的泵压小很多，管筒中的混凝土拌合物的相对运动速率低，不会形成剪切滑移层。因此，滑管仪仅能评估由润滑层和柱塞流形成的混凝土泵送过程。

在实际工程中，利用流变仪来测量混凝土拌合物的流变性能并据此预测其泵送性能的想法是难以实现的。这是因为流变仪价格昂贵且不便携带。利用流变仪测量的数据进行流变参数的计算较为复杂，在施工现场对混凝土流变参数进行测量和计算是一项较为耗时的工作。因此，有必要研究 HFC 的流变性能、工作性能和泵送性能之间的关系及其影响因素。

1 实验

1.1 原料

制备混凝土所用的胶凝材料包括 P.I 42.5 水泥(cement)、粉煤灰微珠(FAM)[19]、一级粉煤灰(FA)、S95 级粒化高炉矿渣(GGBS)和硅灰(SF)。外加剂采用固含量为 40% (质量分数)的聚羧酸减水剂。细骨料选用细度模数为 2.4 的天然河砂，粗骨料选用 5~10 mm 的破碎石灰石。

1.2 样品制备

采用实际泵送工程中使用过的高强大流动性混凝土 HFC1 与 HFC2 作为基准组，其配合比如表 1 所示。HFC1 与 HFC2 的水胶比($r_{\mathrm{w/b}}$)分别为 0.274 与 0.167，砂率(r_{s})分别为 0.470 与 0.382，浆骨比($r_{\mathrm{p/a}}$)分别为 37.3:62.7 与 42.7:57.3。2 组 HFC 的抗压强度如表 2 所示。

表 1 大流态混凝土的配合比

Table 1 Mix proportion of high-fluidity concrete (HFC)

Sample No.	m/(kg·m^{-3})						
	Cement	FAM	FA	GGBS	SF	Fine aggregate	Coarse aggregate
HFC1	400	0	160	0	25	753	849
HFC2	505	160	0	95	50	575	930

m is the mass of material per volume of cement; FAM is fly ash microsphere; FA is fly ash; GGBS is ground granulated blast-furnace slag; SF is silica fume.

表 2　大流态混凝土的抗压强度

Table 2 Compressive strength σ of HFC

Sample No.	σ/MPa	
	7 d	28 d
HFC1	69.0	92.5
HFC2	96.6	112.8

主要探讨以下 2 个问题：1) 砂率与浆骨比对 HFC 新拌性能的影响规律与影响程度，为进一步完善 HFC 泵送性能的预测模型奠定基础；2) HFC 的工作性能、流变性能与泵送性能之间的区别与联系，为现场评估 HFC 的新拌性能奠定基础。为此需要研究砂率与浆骨比对 HFC 新拌性能的影响。

采用与基准组相同的浆体组成，改变砂率与浆骨比，得到不同配比的混凝土拌合物，如表 3 所示。

表 3　不同砂率与浆骨比的大流态混凝土

Table 3　HFC with different sand ratios r_s and paste aggregate ratios $r_{p/a}$

Sample No.	r_s	$r_{p/a}$
HFC1	0.470	37.3:62.7
HFC1–LSR	0.440	37.3:62.7
HFC1–HSR	0.500	37.3:62.7
HFC1–LPAR	0.470	33.3:66.7
HFC1–HPAR	0.470	41.3:58.7
HFC2	0.382	42.7:57.3
HFC2–LSR	0.352	42.7:57.3
HFC2–HSR	0.412	42.7:57.3
HFC2–LPAR	0.382	38.7:61.3
HFC2–HPAR	0.382	46.7:53.3

LSR is low sand ratio; HSR is high sand ratio; LPAR is low paste aggregate ratio; HPAR is high aggregate ratio.

1.3　试验仪器与测试方法

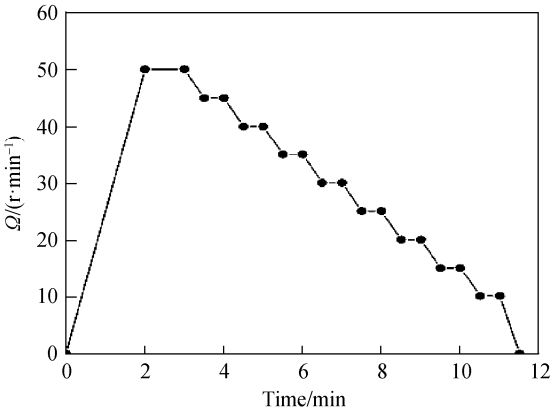
试验时使用德国 Schleibinger 公司生产的 Viskomat XL 型同轴双圆柱流变仪。流变仪的外筒直径为 163.91 mm，内筒直径为 68.88 mm。内筒的有效测量高度为 69.14 mm。在流变试验过程中，内筒始终保持静止状态，外筒旋转。测量混凝土流变参数的流变制度如图 1 所示[20]。

测量流变性能的同时，按照GB/T50080-2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》，测量混凝土的扩展度、扩展时间(T_{500})和 V 型漏斗流过时间(V-funnel time)来评价其工作性能，并利用滑管仪测量混凝土的泵送性能。

2　结果与讨论

2.1　砂率对大流态混凝土新拌性能的影响

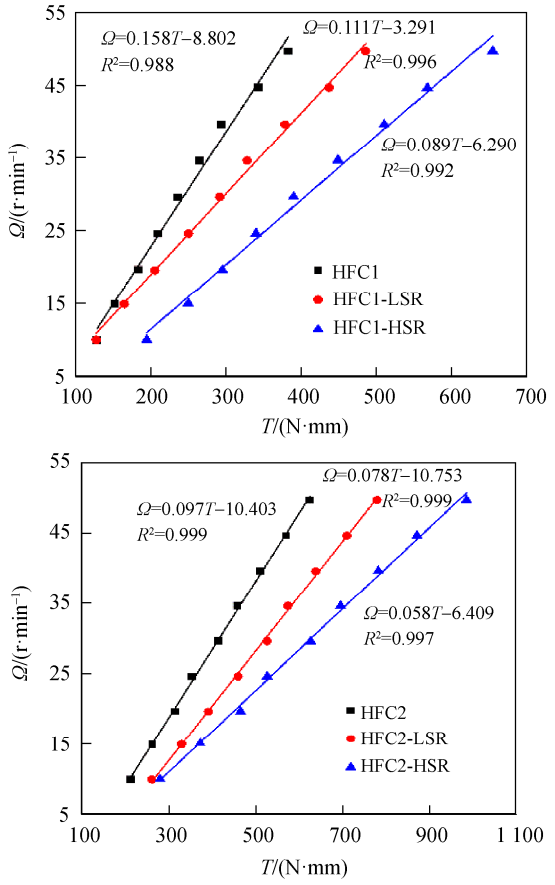
2.1.1　砂率对大流态混凝土流变性能的影响　　砂率对 HFC 流变性能的影响如图 2 所示。各测量点通过图 1 中各个台阶处测量得到的稳定转速和扭矩的平均值计算得到，利用最小二乘法进行线性拟合得到直线。直线拟合方差 R^2 均大于 0.98。随着转速增加，所需扭矩线性增加。直线的斜率表征混凝土的塑性黏度，截距表示混凝土的屈服应力与塑性黏度之比[21]。



Ω—Rotational speed.

图 1　测量大流态混凝土流变参数的流变制度

Fig. 1　Rheological scheme used to measure the rheological parameters of HFC



R is correlation coefficient; *T* is torque.

图 2　不同砂率的大流态混凝土的转速与扭矩关系

Fig. 2　Rotational speed–torque relationship of HFC with different sand ratios

根据 Reiner-Riwlin 方程计算不同砂率的 HFC 的屈服应力和塑性黏度，如表 4 所示。随着砂率的增加，HFC 的屈服应力和塑性黏度均先减小后增大。混凝土的屈服应力和塑性黏度越小，其流动性能越好。因此，混凝土的砂率过低或过高都不利于提高混凝土的流动性能。由于细骨料和浆体组成的砂浆在粗骨料之间能够起到润滑作用，可以减少粗骨料之间的摩擦阻力。因此，在保持浆体性能和含量不变的情况下，在一定的范围内增加砂率，可以提高混凝土的流动性。但是细骨料的比表面积大于粗骨料的比表面积。随着砂率的增加，粗骨料和细骨料的总比表面积会增加。在保持浆体性能和含量不变的情况下，包裹骨料表面的浆体含量减少，因此润滑作用减弱，这会造成混凝土流动性能的降低。所以当砂率超过一定的范围，混凝土的流动性会随着砂率的增加而减小。

另外，从表 4 还可看出，砂率的较小变化会引起 HFC 流变性能的较大变化，比如，HFC1-HSR 的砂率仅比 HFC1 高 6.38%，但 HFC1-HSR 的屈服应力比 HFC1 高 26.86%，HFC1-HSR 的塑性黏度比 HFC1 高 77.53%。

表 4 不同砂率的大流态混凝土的流变参数

Table 4 Rheological parameters of HFC with different sand ratios

Sample No.	r_s	Yield stress/Pa	Plastic viscosity/(Pa·s)
HFC1–LSR	0.440	55.05	68.74
HFC1	0.470	51.34	48.29
HFC1–HSR	0.500	65.13	85.73
HFC2–LSR	0.352	127.05	97.82
HFC2	0.382	98.84	78.66
HFC2–HSR	0.412	101.84	131.55

2.1.2 砂率对大流态混凝土工作性能的影响 砂率对 HFC 工作性能的影响如表 5 所示。随着砂率的增加，混凝土的扩展度先增加后降低。混凝土拌合物的扩展度与其屈服应力有关。屈服应力越小，扩展度越大[22]。因此，HFC 扩展度随砂率的变化趋势与流变性能随砂率的变化趋势是一致的。

混凝土拌合物 T_{500} 和 V 漏流过时间 2 个指标与其塑性黏度的大小有关。T_{500} 和 V 漏流过时间越长，混凝土拌合物的塑性黏度越大[23–24]。因此，根据表 5 中 T_{500} 和 V 漏流过时间的变化规律可知，随着砂率的增加，HFC 的塑性黏度先降低后增加。这与表 4 所显示的流变性能随砂率的变化趋势一致。另外，砂率的较小变化会引起 HFC 工作性能较大变化。

表 5 砂率对大流态混凝土工作性能的影响

Table 5 Influence of sand ratio on workability of HFC

Sample No.	r_s	Slump flow/mm	T_{500}/s	V-funnel time/s
HFC1–LSR	0.440	495	∞	35.0
HFC1	0.470	620	7.4	33.0
HFC1–HSR	0.500	390	∞	∞
HFC2–LSR	0.352	455	∞	132.0
HFC2	0.382	610	13.0	123.0
HFC2–HSR	0.412	450	∞	227.0

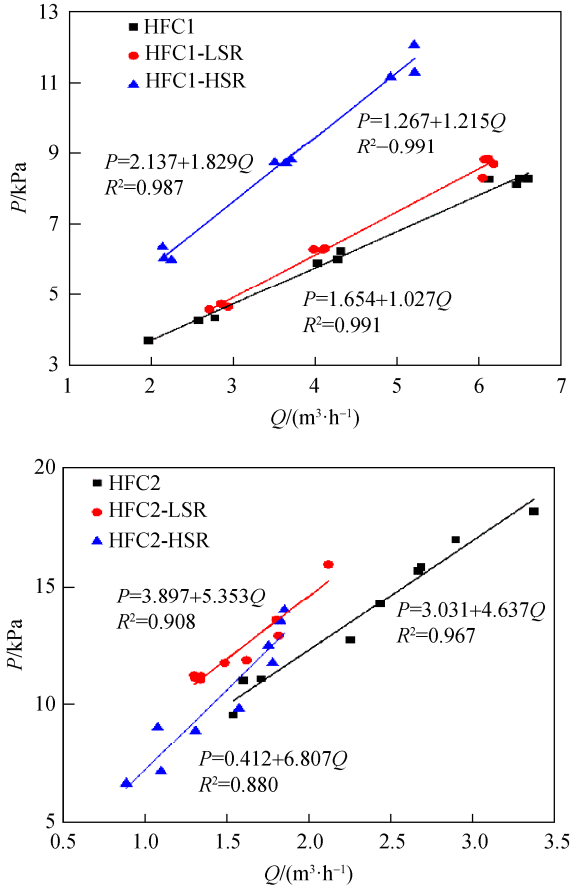
T_{500} is the flow time starting from the lifting of slump cone to the moment that the slump flow reaches 500 mm when measuring the slump flow of concrete.

不可否认的是，工作性测量的精度不如流变测试高，这主要是由于在工作性试验过程中人为操作误差不可避免。还需注意的是，工作性指标只能反映混凝土拌合物屈服应力和塑性黏度的大小，混凝土拌合物剪切增稠或剪切稀化以及触变性能不能用工作性能指标来表征[25–26]。

2.1.3 砂率对大流态混凝土泵送性能的影响(基于滑管试验) 砂率对混凝土泵送性能的影响如图 3 所示。基于滑管试验得到的泵压 P 与流量 Q 之间的线性关系仅反映润滑层对泵送性能的贡献。图 3 中拟合直线的斜率与润滑层的塑性黏度呈正比，拟合直线的截距与润滑层的屈服应力呈正比[17–18]。

如图 3 所示，在浆体用量和新拌性能保持不变的情况下，不同砂率下的拟合直线的斜率与截距相差很大，这证实了润滑层是砂浆层而不是净浆层[10]。从拟合直线的相关系数看，滑管试验的精度不如流变试验的精度高。另外，随着砂率的增加，拟合直线的斜率先减小后增大。也就是说，随着砂率的增加，润滑层的塑性黏度先减小后增加。

需指出的是，图 3 并没有很好地反映出砂率对润滑层屈服应力的影响规律。根据式(2)、式(3)和图 3 计算润滑层的屈服应力与黏性系数，结果如表 6 所示。文献[9–10]表明，泵送过程中形成的润滑层厚度一般在 1~5 mm 之间，大多数情况下润滑层的厚度在 2 mm 左右[10]。为了更为直观地分析滑管试验结果，假定润滑层的厚度为 2 mm。基于该假设计算润滑层的塑性黏度，结果如表 6 所示。比较表 4



P is pressure; *Q* is flow rate.

图 3　不同砂率的大流态混凝土的泵压与流量关系(基于滑管试验)

Fig. 3　*P*–*Q* relationship of HFC with different sand ratios based on Sliper test

表 6　润滑层的流变参数

Table 6　Rheological parameters of the lubrication layer

Sample No.	Yield stress /Pa	Viscosity coefficient /(Pa·s·mm^{-1})	Plastic viscosity /(Pa·s)
HFC1–LSR	79.82	3.44	6.87
HFC1	104.20	2.90	5.81
HFC1–HSR	134.63	5.17	10.35
HFC2–LSR	245.51	15.14	30.28
HFC2	190.95	13.11	26.23
HFC2–HSR	25.96	19.25	38.50

和表 6 的结果可见，润滑层的塑性黏度远远小于混凝土，这是因为润滑层是砂浆层。润滑层的屈服应力也应远远小于混凝土。但表 4 和表 6 的数据显示，有些组别的润滑层屈服应力高于混凝土的屈服应力，有些组别则较低。总的来说，滑管试验得到的润滑层的屈服应力与流变仪测量的相应的混凝土的屈服应力在数量级上是相等的，这显然是不合理的。重复上述试验还是得到类似的结果，因而可以排除试验误差的影响。注意到首篇介绍滑管仪的文献[17]也给出类似的结论。因此，可认为基于滑管试验得到的润滑层的屈服应力与实际值之间存在较大的误差。使用滑管仪时应留意此问题。

2.2　浆骨比对大流态混凝土新拌性能的影响

2.2.1　浆骨比对大流态混凝土流变性能的影响　图 4 为浆骨比对 HFC 流变性能的影响。随着浆骨比的增加，HFC 的塑性黏度和屈服应力逐渐降低。混凝土中的浆体在骨料之间起到很好的润滑作用，可以减少骨料颗粒之间的摩擦阻力。因此，在保持浆体和骨料性能不变的情况下，随着浆骨比的增加，混凝土的流动性能会得到改善。

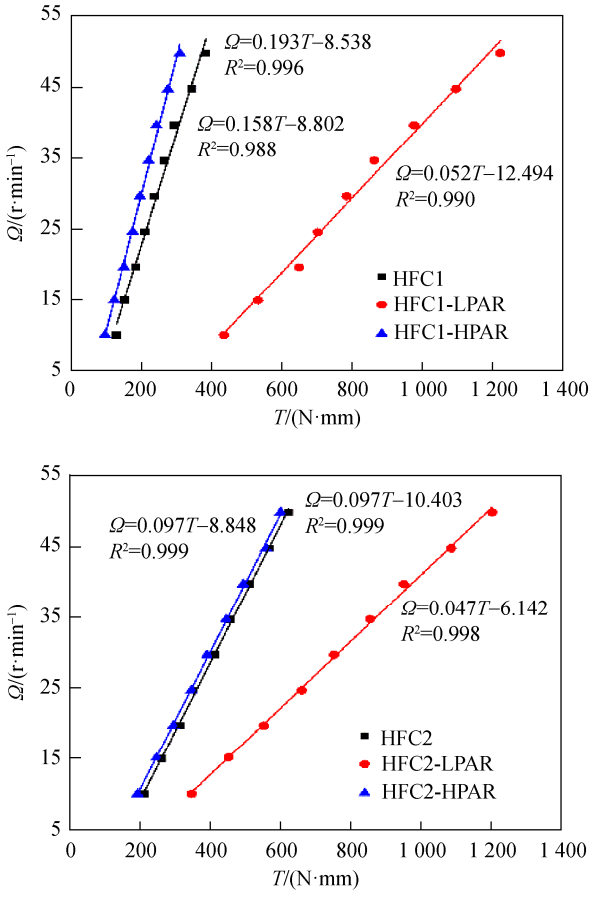


图 4　不同浆骨比的大流态混凝土的转速与扭矩关系

Fig. 4　Rotational speed-torque relationship of HFC with different paste aggregate ratios

由表 7 可见，浆骨比的较小变化会引起 HFC 流变性能的较大变化。比如，HFC1–LPAR 的浆骨比仅比 HFC1 低 16.07%，但 HFC1–LPAR 的屈服应力比 HFC1 高 331.32%，HFC1–LPAR 的塑性黏度比 HFC1 高 203.85%。

表 7 不同浆骨比的大流态混凝土的流变参数

Table 7 Rheological parameters of HFC with different paste aggregate ratios

Samplem No.	$r_{p/a}$	Yield stress/Pa	Plastic viscosity/(Pa·s)
HFC1–LPAR	33.3:66.7	221.44	146.73
HFC1	37.3:62.7	51.34	48.29
HFC1–HPAR	41.3:58.7	40.77	39.53
HFC2–LPAR	38.7:61.3	120.44	162.34
HFC2	42.7:57.3	98.84	78.66
HFC2-HPAR	46.7:53.3	84.07	78.66

2.2.2 浆骨比对大流态混凝土工作性能的影响 表 8 为浆骨比对 HFC 工作性能的影响。随着浆骨比的增加，混凝土的扩展度逐渐增加，T_{500} 和 V 漏流过时间逐渐减小。混凝土的扩展度越大，其屈服应力越小[22]；混凝土 T_{500} 和 V 流过时间越长，其塑性黏度越大[23–24]。所以随着浆骨比的增加，混凝土拌合物的屈服应力和塑性黏度逐渐降低。这与流变试验的结果一致。另外，浆骨比的较小变化会引起 HFC 工作性能的较大变化。

表 8 浆骨比对大流态混凝土工作性能的影响

Table 8 Influence of paste aggregate ratio on workability of HFC

Sample No.	$r_{p/a}$	Slump flow/mm	T_{500}/s	V-funnel time/s
HFC1–LPAR	33.3:66.7	260	∞	∞
HFC1	37.3:62.7	620	7.5	33.0
HFC1–HPAR	41.3:58.7	680	7.4	11.0
HFC2–-LPAR	38.7:61.3	350	∞	∞
HFC2	42.7:57.3	610	21.0	123.0
HFC2–HPAR	46.7:53.3	650	13.0	52.0

2.2.3 浆骨比对大流态混凝土泵送性能的影响(基于滑管试验) 浆骨比对大流态混凝土泵送性能的影响如图 5 所示。随着浆骨比的增加，拟合直线的斜率和截距逐渐减小，表明润滑层的塑性黏度和屈服应力逐渐减小。

同样假定润滑层的厚度为 2 mm，根据式(2)、式(3)和图 5 计算润滑层的屈服应力与黏性系数，结果如表 9 所示。比较表 7 和表 9 可见，润滑层的塑性黏度远小于混凝土的塑性黏度。但滑管试验测量得到的润滑层的屈服应力与混凝土的屈服应力在数量级上相等。这同样说明了滑管试验测量得到的润滑层的屈服应力数据的可信度较低。

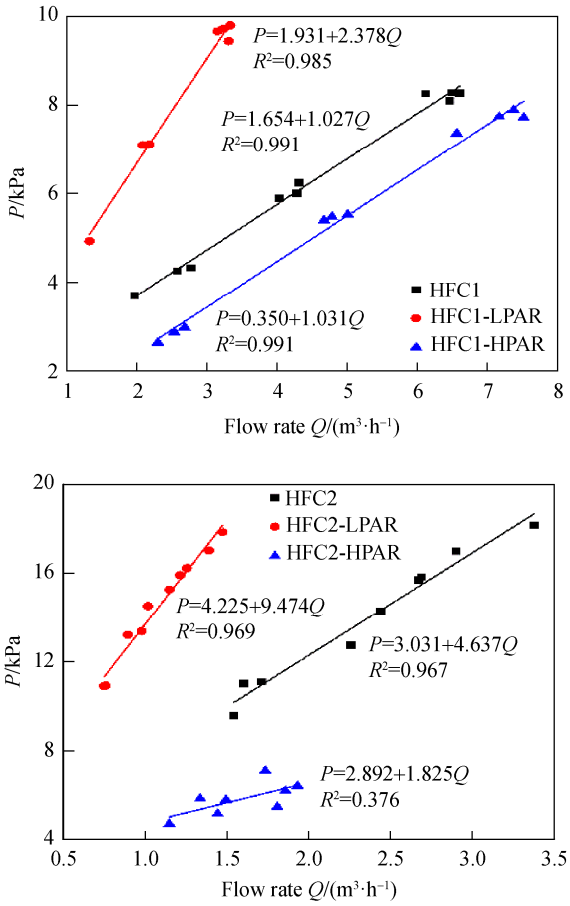


图 5 不同浆骨比的大流态混凝土的泵压与流量关系(基于滑管试验)

Fig. 5 *P*–*Q* relationship of HFC with different paste aggregate ratios based on sliper test

表 9 润滑层的流变参数

Table 9 Rheological parameters of the lubrication layer

Sample No.	Yield stress/Pa	Viscosity coefficient /(Pa·s·mm^{-1})	Plastic viscosity /(Pa·s)
HFC1–LPAR	121.65	6.73	13.45
HFC1	104.20	2.90	5.81
HFC1–HPAR	22.05	2.92	5.83
HFC2–LPAR	266.18	26.79	53.58
HFC2	190.95	13.11	26.23
HFC2–HPAR	182.20	5.16	10.32

3 结论

1) 随着砂率的增加，大流动性混凝土的屈服应力与塑性黏度先降低后增加，当砂率提高 6.38%时，大流动性混凝土屈服应力的变化幅度可高达约 27%，塑性黏度的变化幅度可高达约 78%。随着砂率的增加，润滑层的塑性黏度先降低后增加。

2) 随着浆骨比的增加，大流动性混凝土的屈服

应力与塑性黏度逐渐降低，当浆骨比降低 16.07%时，大流动性混凝土的屈服应力的增长可高达约331%，塑性黏度的增长可高达约 204%。随着浆骨比的增加，润滑层的屈服应力与塑性黏度逐渐降低。

3) 砂率或浆骨比对于大流动性混凝土的工作性能的影响规律与流变性能的影响规律基本相同，二者的较小变化会引起大流动性混凝土工作性能的较大变化。

4) 滑管试验所得的泵压与流量的线性关系仅仅反映润滑层对混凝土泵送过程的贡献。泵压–流量直线的线性关系的斜率与润滑层的塑性黏度呈成正比，截距与润滑层的屈服应力呈正比。基于滑管试验测得的润滑层的屈服应力的可信度较低。

参考文献:

[1] CHOI M S, KIM Y J, JANG K P, et al. Effect of the coarse aggregate size on pipe flow of pumped concrete[J]. Constr Build Mater, 2014, 66: 723–730.

[2] TAN Y, ZHANG H, YANG D, et al. Numerical simulation of concrete pumping process and investigation of wear mechanism of the pipe wall[J]. Tribol Int, 2012, 46: 137–144.

[3] SECRIERU E, COTARDO D, MECHTCHERINE V, et al. Changes in concrete properties during pumping and formation of lubrication material under pressure[J]. Cem Concr Res, 2018, 108: 129–139.

[4] FEYS D, DE SCHUTTER G. Changes in rheology of self-consolidating concrete induced by pumping[J]. Mater Struct, 2016, 49: 4657–4677.

[5] BARLUENGA G, GIMÉNEZ M, RODRÍGUEZ A, et al. Quality control parameters for on-site evaluation of pumped self-compacting concrete[J]. Constr Build Mater, 2017, 154: 1112–1120.

[6] FEYS D, KHAYAT K H, KHATIB R. How do concrete rheology, tribology, flow rate and pipe radius influence pumping pressure[J]. Cem Concr Compos, 2016, 66: 38–46.

[7] XIE H, LIU F, FAN Y, et al. Workability and proportion design of pumping concrete based on rheological parameters[J]. Constr Build Mater, 2013, 44: 267–275.

[8] FEYS D, KHAYAT K H. Recent developments in evaluating pumping behavior of flowable and self-consolidating concrete[J]. J Sustain Cement-Based Mater, 2015, 4(3–4): 238–251.

[9] KWON S H, JANG K P, KIM J H, et al. State of the art on prediction of concrete pumping[J], Int J Concr Struct Mater, 2016, 10(3): 75–85.

[10] CHOI M, ROUSSEL N, KIM Y, et al. Lubrication layer properties during concrete pumping[J]. Cem Concr Res, 2013, 45: 69–78.

[11] SECRIERU E, FATAEI S, SCHRÖFL C, et al. Study on concrete pumpability combining different laboratory tools and linkage to rheology[J]. Constr Build Mater, 2017, 144: 451–461.

[12] INGBER M S, GRAHAM A L, MONDY L A, et al. An improved constitutive model for concentrated suspensions accounting for shear-induced particle migration rate dependence on particle radius[J]. Int J Multiphase Flow, 2009, 35(3): 270–276.

[13] CHOI M S, PARK S B, KANG S. Effect of the mineral admixtures on pipe flow of pumped concrete[J]. J Adv Concr Technol, 2015, 13: 489–499.

[14] CHOI M S, KIM Y J, KWON S H. Prediction on pipe flow of pumped concrete based on shear-induced particle migration[J]. Cem Concr Res, 2013, 52: 216–224.

[15] YEN T, TANG C W, CHANG C S, et al. Flow behavior of high strength high-performance concrete[J]. Cem Concr Compos, 1999, 21(5–6): 413–424.

[16] FERRARIS C F, OBLA K H, HILL R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete[J]. Cem Concr Res, 2001, 31(2): 245–255.

[17] MECHTCHERINE V, NERELLA V N, KASTEN K. Testing pumpability of concrete using sliding pipe rheometer[J]. Constr Build Mater, 2014, 53: 312–323.

[18] NERELLA V N, MECHTCHERINE V. Virtual sliding pipe rheometer for estimating pumpability of concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 170: 366–377.

[19] WANG Q, WANG D, CHEN H. The role of fly ash microsphere in the microstructure and macroscopic properties of high-strength concrete[J]. Cem Concr Compos, 2017, 83, 125–137.

[20] WALLEVIK J E. Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown[J]. Cem Concr Res, 2009, 39: 14–29.

[21] WALLEVIK O H, FEYS D, WALLEVIK J E, et al. Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials[J]. Cem Concr Res, 2015, 78: 100–109.

[22] ROUSSEL N, STEFANI C, LEROY R. From mini cone test to Abrams cone test: Measurement of cement based materials yield stress using slump tests[J]. Cem Concr Res, 2005, 35: 817–822.

[23] THRANE L N, KOLARIK F, PADE C, et al. Assessment of the V-funnel test as a tool to measure plastic viscosity[C]//Proceeding of the 5th North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, USA, 2013.

[24] MOHAMMED T U, RAHMAN M N. Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete[J]. Constr Build Mater, 2016, 125: 832–841.

[25] CYR M, LEGRAND C, MOURET M. Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behavior of cement pastes containing or not mineral additives[J]. Cem Concr Res, 2000, 30: 1477–1483.

[26] WALLEVIK O H, WALLEVIK J E. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes[J]. Cem Concr Res, 2011, 41: 1279–1288.